

GROUPE THÉMATIQUE

SYSTÈME SOLAIRE

Lydie Bonal, John Carter, Sébastien Charnoz, Agnès Cousin, Evelyn Füre, Raphael F. Garcia, Olivier Groussin, Benoît Langlais, Alice Le Gall, Alessandro Morbidelli (Président), Cathy Quantin, Francis Rocard (Thématicien), Sandrine Vinatier,

L'étude du Système solaire s'organise autour de trois grandes questions :

QI. Quelle est l'origine du Système solaire ?

Ce sont essentiellement les 100 premiers millions d'années du Système solaire dont il est question ici, depuis la formation des premiers solides, il y a 4,567 milliards d'années lors de la formation du disque protoplanétaire, jusqu'à l'établissement de l'architecture finale de notre système planétaire, avec ses planètes et petits corps. Différents processus, pas encore complètement élucidés, ont fait naître deux types de planètes dans deux régions distinctes, séparées sans doute par la « ligne de glace d'eau » : à l'intérieur, les planètes telluriques et à l'extérieur, les planètes géantes. Un objectif fondamental est de comprendre quels sont les processus et événements, peut-être contingents, qui ont donné au Système solaire une structure si atypique parmi les systèmes planétaires observés. Pour les planètes géantes, on s'intéresse aussi à la formation de leurs anneaux et satellites.

QII. Quelle a été l'évolution et quelles sont les propriétés actuelles des corps ?

Il s'agit ici de retracer les chemins d'évolution, distincts pour chaque corps, qui ont créé les disparités de caractéristiques physico-chimiques (atmosphère, surface, intérieur) entre les planètes au sein même des deux grandes familles (telluriques et géantes) ainsi qu'entre leurs satellites. Une des questions centrales pour les planètes telluriques concerne la divergence évolutive entre Vénus, la Terre et Mars, qui a fait de la première une fournaise infernale, de la dernière un désert glacé, en laissant seulement la Terre en conditions habitables. Pour les géantes, la redistribution des éléments lourds au sein de leur atmosphère reste mal connue, ainsi que les interactions satellites-magnétosphère; les connaissances sur la structure interne d'Uranus et Neptune sont presque inexistantes

QIII. Où se trouvent les environnements habitables et comment le sont-ils devenus ?

Ces questions sont partagées avec l'exobiologie et sont donc aussi discutées dans le chapitre du groupe E2P2. Dans le cadre de la formation et évolution du Système solaire on s'intéresse surtout aux origines de la matière organique et de l'eau et leur incorporation dans les planètes telluriques. D'autres questions majeures portent sur l'origine de la disparité en abondance d'eau dans les satellites des planètes géantes, ainsi que les processus de dissipation qui peuvent, dans certains cas, maintenir un océan liquide sous leurs surfaces glacées.

1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

1.1. BILAN SCIENTIFIQUE

1.1.1. SUR LA QUESTION DES ORIGINES

La formation de Jupiter a influencé toute l'architecture et l'évolution du Système solaire. Pour mieux la comprendre il est nécessaire d'élucider la structure interne de Jupiter, la nature de son noyau et l'enrichissement global de la planète en éléments lourds. Ce sont les objectifs de la mission **Juno** de la Nasa, dans laquelle la France a une implication scientifique, soutenue par le Cnes incluant l'attribution de bourses de doctorat et postdoctorat. Depuis 2016, cette mission a permis de sonder non seulement l'intérieur mais aussi l'atmosphère profonde de la planète par une gravimétrie ultra-précise (de plus de 2 ordres de grandeur sur les moments gravitationnels par rapport aux mesures précédentes) rendue possible par une orbite polaire avec un périapse très proche de la planète. Elle a notamment démontré la présence d'un noyau dilué, ce qui indique que Jupiter a accréte à la fois du gaz et des éléments lourds, au moins jusqu'à ce qu'elle ait atteint 60 masses terrestres. Les modèles actuels (2020-2022) prédisent un arrêt de l'accrétion d'éléments lourds quand la planète atteint ~30 masses terrestres et des valeurs d'abondance de ces éléments dans l'enveloppe externe trop faibles par rapport aux mesures. Les modèles doivent donc être revus pour expliquer ces observations.

Les missions **Hayabusa2** (Jaxa) et **Osiris-Rex** (Nasa) ont ramené sur Terre des échantillons des astéroïdes géocroiseurs carbonés Ryugu (5,4 g de matière en 2020) et Bennu (environ 120 g en 2023). Pour Ryugu, les analyses préliminaires ont été effectuées par 6 groupes thématiques, impliquant au total 24 scientifiques français dont deux «*group deputy leads*». Pour Bennu l'implication de la communauté française dans l'analyse préliminaire de ces échantillons est limitée à deux équipes. Du point de vue de la question des origines, le résultat marquant est que ces deux astéroïdes ont la même nature chimique et isotopique que les météorites de type CI, avec quelques rares différences de nature pétrologique (par exemple l'existence de quelques phases non altérées qui semblent les parents de minéraux communs dans les météorites primitives). Les météorites de type CI jouent un rôle privilégié en cosmochimie car elles ont la composition élémentaire la plus proche de la composition solaire. Les météorites CI sont très rares, mais le fait que les deux premiers astéroïdes primitifs échantillonnés soient de cette nature suggère que la matière CI n'est pas rare en réalité. La rareté des météorites CIs s'expliquerait a priori par leur destruction pendant l'entrée atmosphérique, à cause de l'extrême fragilité de ces objets constatée lors de l'expérience d'impact et des opérations d'échantillonnage sur Ryugu et Bennu.

1.1.2. SUR LA QUESTION DE L'ÉVOLUTION ET DES PROPRIÉTÉS DES CORPS

Le résultat phare sur cette question a été apporté par la mission **InSight** (Nasa) et en particulier par le sismomètre français Seis déployé sur Mars en 2018. Tout d'abord la sismicité de la planète a pu être estimée comme étant comprise entre celle de la Lune et de la Terre. Un essaim de sismicité a été localisé dans la zone de Cerberus Fossae dès 2019, démontré en 2023 comme étant associé à une activité volcanique induite par la présence d'un panache chaud sous cette région. Les mesures de Seis ont également permis en 2021 de localiser des impacts de météorites à des distances inférieures à 300 km ainsi que d'enregistrer deux impacts majeurs (diamètres des cratères > 130 m). Ces mesures permettent de mieux comprendre le lien entre les impacts et les ondes sismiques, ainsi que de mieux connaître la structure interne de Mars. La stratification de la planète a été déterminée (Fig. 1) et présente une croûte dont l'épaisseur moyenne varie entre 30 et 72 km, une lithosphère d'au moins 400 km d'épaisseur et un noyau de ~1650 km entouré par une couche de matériaux fondus à la base du manteau martien. Les efforts pour garder la mission **InSight** active ont permis d'enregistrer un "gros" séisme de magnitude supérieure à 4,3 en mai 2022 à la toute fin de la mission qui a excité des ondes de surface et les modes de vibration de la planète. Les équipes de recherche françaises soutenues par le Cnes sont fortement impliquées dans ces publications.

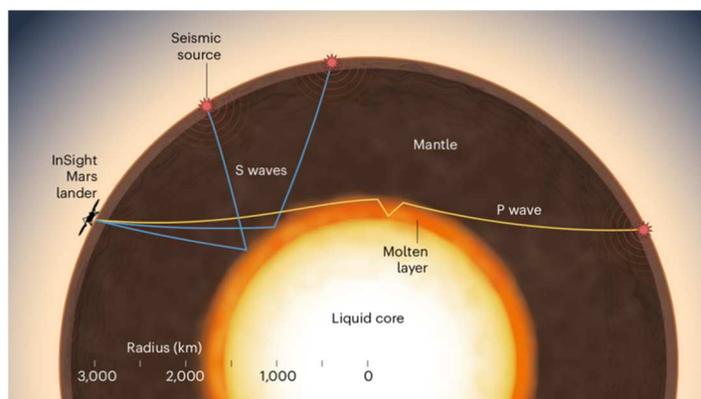


Fig. 1. Schéma des mesures sismiques d'InSight et taille des différentes couches géophysiques de Mars.

Les missions orbitales ExoMars/TGO (Esa) lancée en 2016 et **EMM** lancée en 2020 (sonde **Hope**, MBRSC-Mohammed Bin Rashid Space Center des Émirats Arabes Unis), qui impliquent la participation scientifique de plusieurs membres de la communauté française (la participation à EMM se faisant hors du cadre Cnes à la demande des EAU), ont permis de préciser la composition de l'atmosphère martienne, notamment concernant la vapeur d'eau, l'ozone, ou HCl, ainsi que son couplage avec le cycle des tempêtes de poussières et/ou cristaux de glace au pôle Nord, et sa structure thermique 3D (y compris de la thermosphère). Le débat sur le cycle du méthane et son origine perdure car les observations TGO et sol (MSL Curiosity) sont en désaccord, bien que les observations orbitales imposent désormais une limite supérieure très basse sur les abondances de ce gaz.

La cartographie de l'astéroïde Bennu par la sonde **Osiris-REx** (Nasa) en 2019 a montré une surface globalement homogène, avec quelques différences notables près de l'équateur et sur des zones particulières comme certains cratères ou gros cailloux. Les résultats sont en accord avec la classification de Bennu comme astéroïde de type B. L'étude des fractures observées sur les roches de Bennu a permis de confirmer le rôle de la fatigue thermique et d'élucider l'origine du régolithe.

La mission **Gaia** (Esa) a poursuivi sa moisson de données, et la dernière "Data Release 3" de 2022 contient l'astrométrie et le spectre en réflectance de plus de 60 000 petits corps du Système solaire, dans toutes les familles (astéroïdes, comètes, Troyens, Centaures, et objets Trans-Neptunien). Ces données ont permis de faire des études statistiques sur un échantillon homogène, révélant ainsi en particulier les effets du vieillissement spatial sur les astéroïdes de type S. **Gaia** a aussi permis de faire des avancées majeures dans la prédiction des occultations stellaires, en améliorant à la fois la précision du catalogue stellaire et des orbites des petits corps. Ainsi de nombreuses campagnes de suivi d'occultation, du sol comme de l'espace (notamment par le satellite Esa **Cheops**), ont pu être effectuées. Une de ces campagnes a permis la découverte d'anneaux autour de l'objet Trans-Neptunien Quaoar par une équipe internationale avec une forte implication française.

Les mesures de gravimétrie par effet Doppler sur les communications radio de la sonde **Juno** ont aussi permis de caractériser la dynamique de l'atmosphère de Jupiter. Son radiomètre micro-onde a révélé que les espèces condensables comme l'ammoniac ne sont pas distribuées uniformément dans l'atmosphère de Jupiter, même quand elles sont entièrement vaporisées. La mise en évidence d'éclairs peu profonds, là où l'eau devrait être sous forme solide, corrélés avec l'abondance d'ammoniac a permis de mettre en évidence le rôle très important des orages liés à la formation de grêle d'ammoniaque qui fournit un mécanisme efficace de transport vers le bas de ces éléments lourds. D'autres résultats sur le champ magnétique de Jupiter sont décrits dans le rapport du groupe SHM. Les observations avec le **JWST** ont aussi permis de mettre en évidence un jet étroit autour de l'équateur dans la basse atmosphère (pressions de 100-200 mbar) de Jupiter.

JWST et **Juno** ont permis de mieux caractériser les propriétés thermiques, la composition de surface et les aurores des satellites Galiléens, notamment Europe et Ganymède. Ces résultats participent également à la préparation de la mission **Juice** qui opérera dès 2031 (Esa).

1.1.3. SUR LA QUESTION DES ENVIRONNEMENTS HABITABLES

Les résultats de la sonde **Hayabusa 2** reviennent à la une sur cette question avec la caractérisation de la matière organique de l'astéroïde Ryugu. Une analyse préliminaire de la composition chimique de tous les grains récoltés a été faite depuis début 2021 au Japon à l'aide du microscope infrarouge hyperspectral **MicrOmega** de conception française, le jumeau de celui embarqué sur l'atterrisseur **Mascot** (Fig. 2). Cette analyse a notamment permis de détecter des centaines d'inclusions de carbonates, de quelques dizaines à quelques centaines de microns en taille. Ces carbonates se sont formés seulement quelques millions d'années après le début de la formation du Système solaire, soit par fusion de la glace de CO₂, soit par altération de molécules organiques, riches en carbone.



Fig. 2. L'instrument MicrOmega de Hayabusa 2 installé dans la salle de curation de la Jaxa

Mars Express (Esa ; PI-ship français du spectro-imageur Omega), grâce à deux décennies d'accumulation de données, a produit les premières cartes globales complètes et à haute résolution concernant les minéraux hydratés et leur teneur en eau sur Mars. Les résultats des rovers **Curiosity** et **Perseverance** de la Nasa (co-PI-ship français de ChemCam et SuperCam, instruments de spectrométrie Libs puis Libs/Raman/IR) sont discutés en détail dans le rapport du groupe E2P2.

Enfin les données collectées par la sonde **Cassini** (Nasa, 2004-2017) sont encore source de résultats. Elles ont notamment permis d'établir la présence d'un océan d'eau liquide sous la croûte glacée de Mimas et ont confirmé l'existence d'anomalies thermiques sur Encelade, au-delà même de sa région polaire Sud. Les observations de Titan aident à mieux comprendre sa météorologie et contribuent à préparer la future mission vers cet autre monde-océan, la mission **Dragonfly** (Nasa), dans laquelle la France est impliquée scientifiquement et instrumentalement (livraison du chromatographe de l'instrument DraMS).

1.2. BILAN PROGRAMMATIQUE

Le bilan par rapport à la prospective du groupe en 2019 est positif. Nous reprenons ici les anciennes priorités GTSS.

Échantillons de Mars, de la Lune et de quelques petits corps. Le programme de retour d'échantillon est en plein essor, avec

- (i) **MSR** (récolte d'échantillons martiens) en cours dans le cadre d'une collaboration Nasa-Esa, mais qui souffre actuellement d'important surcoûts et problèmes techniques et risque d'être retardé avec un retour d'échantillon au-delà de 2035
- (ii) **MMX** (échantillons de la lune martienne Phobos) avec la finalisation et l'envoi à la Jaxa du rover IDEFIX de fabrication franco-allemande et du spectro-imageur infrarouge français MIRS, pour un lancement en 2026
- (iii) les échantillons lunaires de la région du Mons Rümker récoltés par la mission **Chang'E5** de la CNSA, dont un don de 1,5 g a été fait à la France par la Chine, et
- (iv) les échantillons des astéroïdes Ryugu et Bennu.

Mise en programme d'une mission vers Uranus et Neptune. Une telle mission n'a pas encore été formellement approuvée, mais elle est inscrite dans le Decadal Survey de la Nasa et Voyage 2050 de l'Esa. La communauté se mobilise sur cet objectif (voir Section 2).



Fig. 3. Gauche : Photo prise par une caméra à bord de la sonde **Juice** quelques heures après son lancement le 14 avril 2023. On y distingue une partie de l'instrument MAJIS (PI-ship français). Droite : vue d'artiste de la sonde **EnVision** qui sera en orbite autour de Vénus dans les années 2030.

Étude de Vénus et de son climat. L'adoption par l'Esa de la mission **EnVision** (Fig. 3) en janvier 2021 répond à cette priorité. La France est très investie dans cette mission, avec le PI-ship de l'expérience de Radio Science et du canal UV du spectromètre embarqué. La mission **EnVision** sera accompagnée de deux missions Nasa complémentaires, **Veritas** (qui intègre du « hardware » fourni par le Cnes et des co-I français) et **DaVinci+** (participation scientifique). Les missions **Veritas** et **EnVision** reprendront la cartographie de la surface de Vénus là où la mission **Magellan** (1990-1994) l'a laissée mais avec une résolution accrue grâce à des radars imageurs nouvelle génération dotés de capacités interférométriques. L'un des principaux objectifs de ces missions est d'apporter la preuve irréfutable d'un volcanisme contemporain sur Vénus. **DaVinci+** effectuera un sondage de l'atmosphère avec des analyses de sa composition chimique et isotopique.

Étude de la différenciation des corps. La mission **Psyche** (Nasa) dans laquelle la France a une participation scientifique, permettra d'étudier, pour la première fois, un astéroïde avec une forte composante métallique et dont la véritable nature demeure mystérieuse à la lumière des observations depuis le sol. La mission **Juice** lancée en 2023 (Fig. 2), étudiera les propriétés du noyau de Ganymède, un satellite glacé entièrement différencié.

Structure interne des lunes et petits corps. Elle sera l'objectif de la mission **Hera** de l'Esa qui étudiera à partir de 2026 les conséquences de l'impact de la sonde **Dart** (Nasa) sur le satellite Dimorphos de l'astéroïde Didymos. L'impact a généré un grand nuage de poussières et a engendré une diminution de 33 minutes de la période orbitale de la lune, initialement de 11,92 heures. **Hera** permettra de mesurer la masse de Dimorphos et de déterminer la taille du cratère, le transfert de moment linéaire dû à l'impact, et l'éjection des poussières et de caractériser la structure interne aussi par sondage radar. La mission **Juice** va aussi sonder la structure interne d'Europe et Ganymède.

Magnétosphère des lunes et petits corps. Elle sera un des objectifs scientifiques de la mission **Comet Interceptor** approuvée par l'Esa, et en particulier des instruments à responsabilité française COMPLIMENT et LEES (voir rapport du groupe SHM). La mission **Juice** étudiera la magnétosphère de Ganymède, le seul satellite à avoir un champ magnétique propre.

Opportunités pour instruments sur étagère dans le cadre des nouvelles missions lunaires. L'instrument français DORN, du fait de sa simplicité, a été financé par le Cnes pour la mesure du dégazage du Radon de la surface lunaire à bord de l'atterrisseur chinois **Chang'E 6** en juin 2024. Le modèle de recharge du sismomètre français Seis pour **InSight** a été adapté et fourni au JPL (Jet Propulsion Laboratory) pour un déploiement lunaire en 2025 sur une mission **CLPS**, ce qui réaffirme le leadership Français sur les capteurs de sismologie planétaire.

La prospective 2019 ne faisait pas de recommandations sur deux missions Esa, considérées comme acquises : **BepiColombo** et **ExoMars/Rosalind Franklin**. La sonde **BepiColombo** poursuit actuellement son voyage, avec une insertion orbitale autour de Mercure prévue en décembre 2025. Au cours des dernières années, plusieurs survols de la Terre, de Vénus, et de Mercure, ont permis de tester les instruments à bord à responsabilité ou co-responsabilité française (Phebus, Simbiosys, Pep et MPPE). A l'inverse, la mission **ExoMars** a dû être reportée à 3 mois de son lancement prévu en sept. 2022, à cause de l'arrêt de toute collaboration Esa-Roscosmos, par suite de l'invasion de l'Ukraine par la Russie. L'Esa envisage un partenariat avec la Nasa pour un scénario de lancement estimé à 2028.

2. PROSPECTIVE

Nous ne revenons pas ici sur les missions en cours ou engagées (voir section 1.2) et présentons seulement les nouvelles idées de mission, selon les questions scientifiques auxquelles elles apportent une réponse. Ces nouvelles idées de mission ont fait l'objet de réponses à l'appel à idées préparatoire à ce SPS. Pour simplifier, on présentera chaque mission par la question principale qu'elle adresse, même si certaines sont aussi pertinentes pour les autres questions de la discipline.

2.1. SUR LA QUESTION DES ORIGINES

La priorité majeure sur cette question est une mission vers Uranus ou Neptune, prioritairement avec sonde de rentrée atmosphérique. L'origine de ces planètes, caractérisées par une atmosphère d'hydrogène et d'hélium bien moins massive que celles de Jupiter ou Saturne, reste mystérieuse. Pourtant, elles sont les plus semblables aux planètes les plus communes dans les systèmes extrasolaires, appelées justement « mini-Neptunes ». Pour comprendre leur origine, il est nécessaire de caractériser leur structure interne, par le biais de cartographies du champ gravitationnel et du champ magnétique, mais aussi par des observations d'astérosismologie lors de la phase d'approche. La mesure de la composition atmosphérique par une sonde de rentrée de type Galileo permettrait de déterminer les enrichissements des différents éléments volatiles (eau, carbone, azote, gaz rares, ...) ainsi que leur composition isotopique par rapport au Soleil, et comparer ces résultats à ceux obtenus pour l'atmosphère de Jupiter. Les observations IR et UV de la haute atmosphère à partir de l'orbiteur permettraient aussi de mesurer sa composition et d'observer la dynamique des vents et des nuages. Lors de son dernier Planetary and Astrobiology Decadal Survey en 2022, la Nasa a émis comme priorité une future mission de type Flagship vers Uranus. Il serait souhaitable que l'exploration d'Uranus soit réalisée dans un cadre de collaboration Nasa/Esa, peut-être avec l'Esa prenant à charge la sonde atmosphérique, selon l'exemple

Cassini/Huygens. Plusieurs instruments pourraient être développés par la communauté nationale pour cette sonde de rentrée ainsi que pour l'orbiteur (spectromètre de masse, TLS, néphélomètre, analyseur de poussières à impact, spectromètre submillimétrique, spectro-imageur Vis/Nir, spectro-imageur UV, récepteur radio haute fréquence, spectromètre à ions, analyseur d'électrons, imageur Doppler pour astérosismologie). Une sonde de rentrée atmosphérique aurait son intérêt aussi sur Saturne, peut-être couplée à une mission vers ses satellites glacés (voir sect. 2.2.3), mais elle est moins prioritaire qu'une sonde dans Uranus, car nous avons déjà des informations partielles sur la composition de l'atmosphère saturnienne.

Une priorité substantielle serait de caractériser les propriétés isotopiques d'une comète, par analyse *in situ* avec un atterrisseur et/ou un retour (cryogénique ou pas) d'échantillons, pour placer ces objets dans le cadre de la dichotomie isotopique entre les météorites carbonées et non-carbonées. L'analyse chimique et isotopique *in situ* d'une comète de la ceinture principale serait aussi importante pour comprendre si ces objets sont des comètes capturées ou des astéroïdes primitifs ayant conservé une partie de leur glace primordiale, contrairement aux corps parents des météorites. Une priorité moindre, mais néanmoins importante, est de continuer la récolte d'échantillons d'astéroïdes, commencée par les missions **Hayabusa 1** et **2** et **Osiris-REx**, mais en se concentrant sur des objets de la ceinture principale, plus primordiaux qu'un géocroiseur, et ayant des propriétés spectrales qui ne les lient pas a priori à des météorites connues. La récolte de poussières interplanétaires dans la stratosphère terrestre par ballon a aussi son intérêt pour échantillonner statistiquement astéroïdes et comètes.

Le retour d'un échantillon de l'atmosphère de Vénus est également une priorité, pour pouvoir comparer l'abondance et les propriétés isotopiques des éléments volatils, notamment les gaz rares, ce qui donnerait les premières indications sur la composition de Vénus par rapport à la Terre.

2.2. SUR LA QUESTION DE L'ÉVOLUTION ET DES PROPRIÉTÉS DES CORPS

Une priorité substantielle est de mieux caractériser la structure interne de la Lune, et particulièrement sous sa face cachée, par un réseau sismique. Pour ce faire, il faudra saisir les opportunités offertes par les nombreux futurs atterrisseurs lunaires, habités ou pas (CLPS, Artemis, Argonaut, missions CNSA, Jaxa, ...). Les sismomètres devront avoir une longue durée de vie pour pouvoir travailler en réseau, tout en étant déployés à des époques différentes. Le développement de la nouvelle génération de sismomètres, les Very Broad Band (VBB) senseurs optiques, plus sensibles que les VBBs actuels dont le stock est proche de l'épuisement, devient donc une urgence, en dépit des difficultés à trouver un partenaire industriel fiable. Toujours dans le contexte lunaire, il serait intéressant de caractériser le régolithe lunaire et la subsurface aussi profondément que possible par radar de pénétration de sol, ainsi que ses propriétés chimiques à l'aide d'un μ Libs. Ces deux instruments devraient être embarqués sur un rover pour couvrir une zone large. Dans le cadre du renouveau d'intérêt général scientifique et exploratoire pour la Lune, les opportunités ne devraient pas manquer. Pour l'origine de l'exosphère lunaire, il est important d'attendre les résultats sur l'échappement du Radon par l'instrument Dorn sur **Chang'e 6** avant de statuer sur l'intérêt de poursuivre l'étude dans le cadre d'une mission de longue durée. La mesure quantitative de la glace et de l'hydratation des pôles de la Lune a également un intérêt pour mieux contraindre l'apport de volatiles au cours du temps dans le Système solaire interne.

Une autre priorité est de profiter de l'opportunité unique du passage de l'astéroïde Apophis près de la Terre, qui devrait générer des séismes par forces de marée sur l'objet. Ces séismes, potentiellement détectables par des géophones intégrés dans des atterrisseurs au format CubeSat, permettront de caractériser la structure interne de ce géocroiseur typique. Si dotée de géophones, la mission **Ramses** proposée à l'Esa est donc une priorité substantielle. Une mission dotée seulement d'un radar, comme la mission **Droid** de la Nasa ou **Ramses** sans la partie géophones, serait moins prioritaire car le sondage radar d'astéroïdes peut être réalisé sur tous petits corps et ne nécessite pas un passage rapproché à la Terre.

Enfin, la structure interne de Vénus mériterait d'être caractérisée par sismologie, soit par le biais d'un ballon atmosphérique sensible à la propagation des ondes sismiques dans l'atmosphère, soit

en monitorant les « airglows » issus des séismes par (nano)-satellites, peut-être même en “piggy back” sur **EnVision**. Ces deux techniques ont déjà fait leurs preuves sur Terre.

2.3. SUR LA QUESTION DES ENVIRONNEMENTS HABITABLES

Commençons par rappeler que la première des priorités est de finaliser le programme MSR du retour d'échantillons martiens, commencé par la mission **Perseverance**, et de porter enfin la mission **ExoMars/Rosalind Franklin** sur Mars.

Concernant les missions nouvelles, la priorité majeure est celle de l'exploration d'Encelade, une lune glacée de Saturne qui présente des caractéristiques « habitables » (un océan liquide en sous-surface en contact avec la partie rocheuse du satellite, en présence d'hydrothermalisme). Ce satellite est désormais la cible de la mission L4 de l'Esa dans le cadre du programme Voyage 2050. Elle est également priorisée comme cible dans une 2ème Flagship Nasa par la *Decadal* américaine « Origins, Worlds, and Life » paru en 2023. Il s'agira de caractériser l'activité, l'habitabilité et le potentiel exobiologique de ce satellite, objectifs qui nécessiteront des instruments à la fois de télédétection, de géophysique et d'analyse *in situ*. Le Cnes doit s'assurer du maintien des filières instrumentales françaises d'excellence pouvant potentiellement embarquer sur une telle mission : sismomètre, radar sondeur, spectromètre IR, spectromètre submillimétrique hétérodyne, analyseur de poussières, un mini-laboratoire (possiblement microfluidique) doté de plusieurs méthodes d'analyse (e.g. nouvelle génération IR, Raman et LIBS in-situ, nouvelle génération GC-MS, HRMS).

Une priorité substantielle est aussi l'analyse *in situ* de la matière organique provenant de l'intérieur de Cérès (planète naine et ancien monde océan), à la recherche d'une chimie organique pré-biotique et aqueuse soumise à des conditions physico-chimiques possiblement plus proches de la Terre ou Mars que des petits corps.

Au gré de possibles futures missions d'opportunités y compris portées par des acteurs hors Nasa et Esa, d'autres corps riches en eau et en matière organique pourraient être visités *in-situ* et constitueraient une priorité de la thématique. S'agissant de Mars, d'autres opportunités pourraient être considérées telle une mission drone de la Nasa ou le programme de retour d'échantillons chinois **Tianwen-3**.

2.4. SYNTHÈSE SUR LES CONCEPTS DE MISSION RECOMMANDÉES.

Objectif	Priorité	Question	Exemple de cadre/concept
Uranus	Majeure	Q1/Q2	Decadal. Collaboration NASA-ESA Contribution européenne sonde rentrée
Encelade /Titan	Majeure	Q3/Q1/Q2	Decadal, Voyage2050 L4
Sismologie lunaire	Substantielle	Q2	SPSS, Mission ISRO, Argonaute
Structure d'Apophis	Substantielle	Q2	RAMSES, DROID
Retour d'échantillon cométaire	Substantielle	Q1	Collaboration NASA-ESA (Caesar, Corsair)
Comètes de la ceinture principale	Substantielle	Q1	Ex. Castalia
Cérès	Substantielle	Q3	Ex. Calico, NASA New Frontier
Retour d'échantillon de l'atmosphère Vénus	Subst/Modérée	Q1	Ex. Vatos
Propriétés du régolithe lunaire	Modérée	Q2	Radar sondeur ou μ LIBS sur rover (Rashid??)
Sismologie Vénus	Modérée	Q2	Ballons NASA our airglow par nanosat (piggyback EnVision?)
Echappement atmosphérique sur Vénus	Modérée	Q2	Mission type MAVEN
Sonde de rentrée dans Saturne	Modérée	Q1	En combinaison avec mission ESA L4?
Échantillons d'astéroïdes non associés aux météorites	Modérée	Q1	?
Récolte de poussières astéroïdales/cométaires	Modérée	Q1	BESAFE/STRATOPART
Distribution matière organique sur Mars	Modérée	Q3	Par drone (NASA) ou opportunité (Tianwen-3)

2.5. LE DÉVELOPPEMENT INSTRUMENTAL

La contribution du Cnes aux missions d'exploration du Système solaire s'exprime essentiellement par la fourniture d'instruments. Il est donc important que le Cnes puisse financer au bon niveau la recherche instrumentale afin de développer des nouveaux concepts, les faire évoluer en TRL jusqu'à leur implémentation finale sur des missions spatiales, mais aussi maintenir les filières instrumentales dont l'excellence a déjà été prouvée, pour conserver l'expertise et améliorer sans cesse les performances. Des missions d'acteurs émergents du spatial peuvent également présenter l'opportunité de faire mûrir ces concepts. Nous passons ci-dessous en revue les filières d'excellence instrumentales mais aussi les nouvelles filières intéressantes à développer.

2.5.1. FILIÈRES D'EXCELLENCE FRANÇAISE EN PLANÉTOLOGIE SPATIALE :

Sismologie hautes performances : La sismologie large bande avec un capteur de hautes performances a démontré son intérêt scientifique dans le cadre de l'instrument Seis à bord d'**InSight**. La prochaine génération d'instruments à large bande passante repose sur un capteur à base d'interférométrie optique spécifiquement développé pour les objets sans atmosphère, la Lune en particulier. Des capteurs avec de tels niveaux de performances n'ayant pas d'équivalent à l'international, ils permettraient de garder un leadership international sur la sismologie planétaire.

Spectro-imageurs IR et UV : Les missions d'exploration vers le Système solaire externe rendent difficile l'implémentation d'instruments de spectroscopie de grande masse (type Majis). Des solutions innovantes sont à creuser permettant une compacité accrue de ce type d'instrument, et/ou une augmentation de la gamme spectrale (avec e.g. des instruments cumulant UV et proche IR, ou un instrument IR allant dans l'IR plus lointain, type Mirs). Des implémentations à la fois pour des mesures orbitales et in-situ sont à maintenir.

Radars sondeurs : En attendant les premières mesures radar à bord du rover ExoMars au plus tôt en 2030, et dans un contexte où les opportunités de vols vers la Lune ou les petits corps se multiplient, l'enjeu est de maintenir le savoir-faire technique et scientifique dans les laboratoires et de continuer à faire évoluer les concepts instrumentaux de type Wisdom/ExoMars ou Jura/Hera pour les rendre de plus en plus versatiles en termes d'objectifs scientifiques et adaptables à une grande variété de plateformes.

Libs : La technique du Libs ("Laser-Induced Breakdown Spectroscopy") a fait ses preuves sur Mars depuis 2012 (instruments ChemCam et SuperCam à bord de Curiosity et Perseverance). Le Libs permet d'obtenir la composition chimique des roches autour des rovers, jusqu'à une dizaine de mètres, pour une zone d'analyse submillimétrique (< 500 microns). L'objectif des prochaines années est de miniaturiser encore plus cette technique, de réduire la taille d'analyse à 50 μm .

Méthodes d'analyse chimique in situ : L'expérience acquise montre que la matière organique n'est que peu abondante à la surface de nombreux corps du Système solaire. Par conséquent, des techniques de pré-concentration et pré-identification doivent être intégrées en amont d'analyses plus complexes par GC, HPLC, HRMS. Le développement de la spectrométrie de masse très haute résolution du type Orbitrap, soutenu depuis de nombreuses années par le Cnes, doit continuer jusqu'à sa démonstration sur mission spatiale.

Microphone : L'important retour scientifique du microphone associé à l'instrument SuperCam sur la mission **Perseverance** ouvre la question de l'emploi de ces instruments sur les missions déployées dans les atmosphères planétaires (Mars, Vénus, Titan) par différentes plateformes (drones, rovers, atterrisseurs, ballons).

2.5.2. NOUVELLES FILIÈRES

Géophones : Les capteurs sismologiques courtes périodes de type géophones sont actuellement considérés pour déterminer la structure de sub-surface des corps sans atmosphère (Lune, astéroïdes, lunes glacées). Les équipes françaises travaillent actuellement à la qualification spatiale

de plusieurs capteurs. Ces instruments seront donc à TRL élevé à la fin 2024 car portés par les projets **SPSS** (Nasa), **Ramses** (Esa).

Néphélomètre : Il s'agit de mesurer la concentration d'aérosols dans une atmosphère, la taille des particules et leur typologie en mesurant l'angle de diffusion d'un rayon laser, une mesure jamais effectuée auparavant hors de la Terre. Ce type d'instrument est intéressant pour des sondes de rentrée atmosphérique proposées dans le cadre de missions vers Uranus, Saturne ou Vénus.

Spectroscopie TeraHz/submm : Des équipes françaises sont impliquées depuis de nombreuses années dans le développement de spectromètres TeraHz/submillimétriques hétérodynes miniaturisés pour cubesat. Au-delà des applications cubesat, une telle miniaturisation est d'un grand intérêt pour toute future mission spatiale.

Spectroscopie IR in-situ : Il apparaît crucial d'améliorer les performances et la miniaturisation des instruments in-situ. Cela inclut les filières existantes de spectroscopie infrarouge de contact (e.g. MicrOmega) ou de proche contact permettant la caractérisation locale (e.g. IRS-SuperCam). De nouvelles filières infrarouge in-situ sont à envisager telles la spectro-polarimétrie, les spectromètres FTIR ou la TLS-IR.